

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630170

研究課題名(和文) ナイキスト基準の限界を超える高速無線伝送を実現する低演算受信機の開発

研究課題名(英文) Faster-than-Nyquist signaling transmissions for high-rate wireless systems

研究代表者

杉浦 慎哉 (Sugiura, Shinya)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30394927

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：利用周波数帯域を増加させることなく送信レートやチャネル容量を大幅に向上させることが可能な faster-than-Nyquist (FTN) 技術について、現実的演算量を実現する新しい FTN 送受信機構成を提案する。特に、ターボ符号などの実用上用いることが不可欠な強力な誤り訂正符号の復号に対応した、軟判定型周波数領域等化 FTN 復調アルゴリズムを開発する。さらに、提案アルゴリズムの受信特性を向上させるため、FTN 受信機に特有の有色熱雑音の影響を考慮した改良 FTN 復調アルゴリズムを提案する。提案アルゴリズムの特性を明らかにするために数値解析による評価を行い、従来方式に対する利得を明らかにする。

研究成果の概要(英文)：We have developed a novel low-complexity soft-decision demodulator for the faster-than-Nyquist (FTN) signaling. More specifically, the proposed demodulator is based on the minimum mean-square error (MMSE)-based frequency-domain equalizer (FDE). Furthermore, in order to improve the achievable error-rate performance of the proposed algorithm, we invoked the low-complexity noise-whitening scheme. The serially-concatenated FTN architecture was proposed, which allows us to attain a good error-rate performance, which is close to that of the conventional Nyquist-based counterpart.

研究分野：情報通信工学、信号処理、無線通信

キーワード：Faster-than-Nyquist 無線通信 ナイキスト基準

1. 研究開始当初の背景

現在実用化されている無線通信システムはナイキスト基準で定義される最小送信シンボル間隔に従っており、これ以上の通信回線大容量化および高速化のためにはより多くの周波数帯域を確保することが前提となる。しかしながら、無線通信に適した周波数帯域は需要の急速の増加とともに枯渇しつつあり、将来の高速大容量の無線アプリケーション実現には大きな壁となっている。1970年代、ナイキスト基準の限界を超える信号伝送を可能とする Faster-than-Nyquist (FTN) コンセプトが提案された。しかしながら、受信機における干渉信号除去に必要な演算量の高さが現実的ではなく、長い間コミュニティから忘れ去られていた。一方、2000年代に入ってから、信号処理能力が向上したことに伴い、欧米を中心に再び FTN 技術が注目を集めてきている。現状ではいまだに受信機での演算量の問題がボトルネックとなり、実用化には至っていない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、利用周波数帯域を増加させることなく送信レートやチャネル容量を大幅に向上させることが可能な FTN 技術を提案することを目的として、現実的演算量を実現する新しい FTN 送受信機構成を提案する。具体的には以下の2点について研究を実施する：

- (1) ナイキスト基準に従うシステムと比べて、同程度の復調演算量を実現する FTN 受信機構成を考案し、上記の従来 FTN 方式の課題を克服する現実的なシステム構成提案に貢献する。
- (2) 最新の符号化技術と FTN 変調技術を融合し、情報理論の観点からロスのない送受信システム設計指針を提案する。

3. 研究の方法

ナイキスト基準で与えられる送信シンボル間隔の限界を超える信号変復調技術を開発する。研究課題は以下に示す3項目(1)-(3)により構成される。

- (1) 低演算量 FTN 信号検出方式の開発：本項目では、実用的処理演算量で動作する FTN 受信システムの信号検出方式を開発する。これまでの進捗として、誤り訂正符号を用いない硬判定受信システムを対象に、周波数領域信号処理を用いることで低演算量を実現する FTN 復調アルゴリズムが提案されている ([1] S. Sugiura, IEEE Wireless Commun. Lett., Oct. 2013)。このアイデアは、現在の受信機の演算レベルで動作可能であることは大変有効であるが、ターボ符号などの実用上用いることが不可欠な強

力な誤り訂正符号の復号に対応していない。そこで、上記硬判定アルゴリズムを拡張し、軟判定復号に対応可能な周波数領域の FTN 復調アルゴリズムを提案する。具体的には、軟値干渉キャンセラのコンセプトを参考に、アルゴリズム構築を実施する。

- (2) 提案 FTN 復調アルゴリズムの改良と誤り訂正符号設計指針の確立：本項目では、上記項目(1)にて導出した低演算量軟判定 FTN 復調アルゴリズムは FTN 特有の有色熱雑音の影響を無視しているため、送信レートが高くなるにつれて性能にロスが大きくなる。ここでは、受信演算量を増大させることなく、有色熱雑音の影響を考慮した、FTN 復調アルゴリズムを提案する。さらに、FTN システムに適した容量に近い性能を達成する符号化手法を提案する。最大伝送容量に近い性能を達成するために、FTN 方式に適した強力な誤り訂正符号を設計する。特に、3つ以上の符号器を接続して用いる接続ターボ符号を利用することで、FTN 送信機の設計パラメータに応じて柔軟に伝送容量に近い受信機を構成する。このとき、ビット誤り率を評価関数としたアプローチでは、符号/復号器設計に必要な工数が多大になることが予想されるが、上記 EXIT チャートを利用した相互情報量の解析結果を設計に用いることにより、繰り返し評価の回数を最小限に抑えながら、理論的伝送容量に近い性能が得られると考える。
- (3) 提案方式の総合評価、従来方式との比較：本項目では、上記研究内容を総合的に評価し、従来方式と比べた際の通信品質向上を明らかにする。総合的な数値解析を実施し、情報理論の観点から従来のナイキスト基準に基づくシステムと比べて実用的に2倍程度の伝送容量増大が見込めることを示す。上記項目(1)で導出した理論的伝送容量を基にして従来技術との性能比較を実施する。特に、周波数帯域、送信レートにおいて公平な比較を行い、提案方式が周波数帯域を増大することなく実用的な送信レートで性能向上が見込めることを明らかにする。

4. 研究成果

2014年度の主な成果は以下の通りである。

- (1) 低演算量 FTN 信号検出方式：チャネル容量に近い性能を実現するためには、low-density parity check (LDPC) 符号やターボ符号などによる繰り返し復号を受信機で行うことが一般的である。そ

のために必要な軟値判定結果を出力可能な低演算量FTN復調アルゴリズムを開発した。特に、軟判定周波数領域等化 (Frequency-domain equalization; FDE) に基づいたアルゴリズムを開発することにより、送信ブロック長が大きい場合でも低演算量を維持することが可能となった。

さらに、これまでは加法的白色ガウス雑音(additive white Gaussian noise; AWGN) 伝搬路を仮定していたが[1]、より現実的な周波数選択性レイリーフェージングに対応するように改良を行った。また、EXITチャートを利用した情報理論的解析により、ターボ符号に基づいた誤り訂正符号のパラメータ設計指針を示した。

ここで、受信信号にはFTN特有の有色雑音に加わっているが、簡単のために白色雑音であると仮定した。したがって、このモデル化誤差の影響により、送信レートの向上とともに誤り率性能が劣化してしまう。この課題の解決は以下の項目(2)で実施した。

2015年度の主な成果は以下の通りである。

- (2) 提案FTN復調アルゴリズムの改良と誤り訂正符号設計指針の確立: 軟判定 FDE では演算量削減のためにFTN特有の有色性雑音の影響を無視している。本項目では有色性雑音を考慮した軟判定 FDE 開発した。これにより、上記項目(1)で提案の方式とほぼ同等の演算量で FTNS の繰り返し検出の性能を改善することを可能とした。

具体的には、アルゴリズム中の白色化作用行列を対角行列に近似することにより、受信演算量の増加を最小限に抑えた。このとき、白色化作用行列を対角近似しない場合と比べて、得られる誤り率特性がほぼ劣化しないことを確認した。

- (3) 提案方式の総合評価: 数値解析により、提案方式の性能評価を行った。以下に、その結果の一部について示す。図1に示したターボ符号化 FTNS システムを考える。図1における最小二乗誤差(minimum mean-square error; MMSE) に基づく軟判定 FDE は有色性雑音を考慮した硬判定 FDE[3] を拡張したものである。
 π_1^{-1} はそれぞれインタリーバとデインタリーバである。図1のシステムのAWGN伝搬路における誤り率を数値シミュレーションにより評価する。ここでは binary phase-shift keying (BPSK) 変調を行い、送受信フィルタとしてロールオフ率が 0.5 のルートレイズドコサインフィルタを用いた。また、符号化率が 1/2 で生成多項式(3,2)を持つ recursive

systematic convolutional (RSC)符号を使用し、インタリーバ長を 2^{17} とした。さらに、内符号部における外部情報の繰り返し交換回数を 2 回、内/外符号部間の交換回数を 21 回とした。

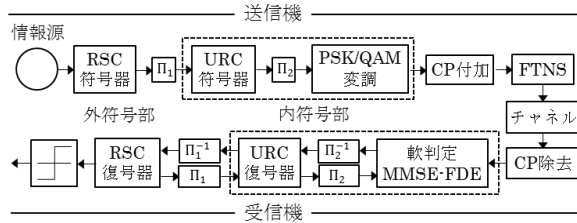


図1. 提案の3ステージ接続ターボ符号化FTN伝送モデル.

図2に3ステージ接続誤り訂正符号化FTN伝送システムの誤り率特性の数値解析結果を示す。(a)はFTNに特有の有色性雑音の影響を考慮した方式、(b)は考慮しない方式のFTN伝送の誤り率特性である。いずれの場合も強力な接続ターボ符号を用いていることから、ある信号対雑音比 (signal-to-noise ratio; SNR) 閾値を超えると急速にエラーフリー性能が達成できることが確認できる。とくに、提案手法は従来手法と比べて低いSNRでエラーフリー性能が実現でき、(a)の場合では、ナイキスト基準の限界に近い性能が得られていることが分かる。

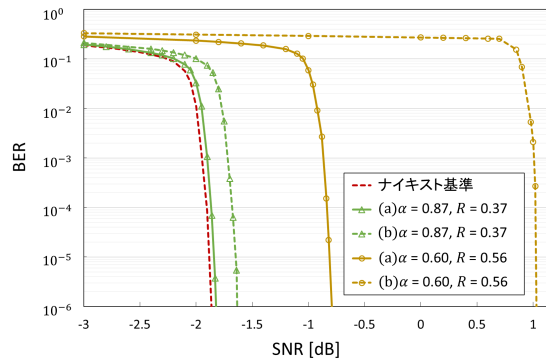


図2. 3ステージ接続FTNSシステムの誤り率.

次に、図3に3ステージ接続誤り訂正符号化FTN伝送におけるエラーフリーSNRと規格化した送信レートとの関係を示す。ここでは、有色雑音を考慮した受信機と考慮していない受信機を比べた。送信レートはナイキスト基準に相当する1倍から2.2倍程度まで変化させた。図3より、送信レートが向上するにつれて、提案の有色雑音を考慮した受信機の利得が大きくなるのがわかる。

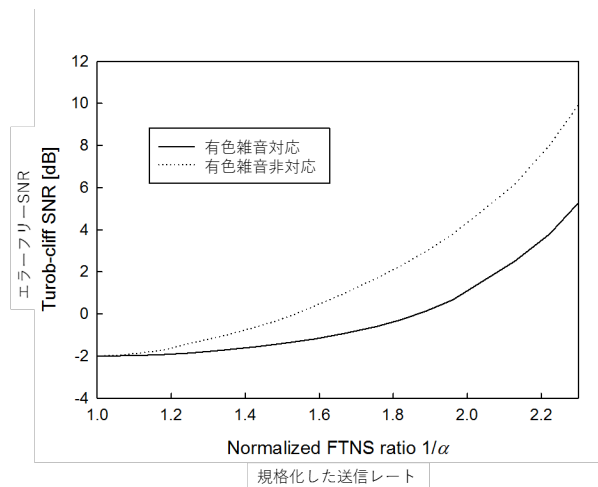


図3 . エラーフリーSNR と規格化送信レート
の関係 .

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- (1) S. Sugiura and L. Hanzo,
"Frequency-domain equalization aided iterative detection of faster-than-Nyquist signaling," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 64, no. 4, pp. 2122-2128, May 2015.
(査読有)
DOI: 10.1109/TVT.2014.2336984

[学会発表] (計 2 件)

- (2) T. Ishihara and S. Sugiura,
"Frequency-domain equalization aided iterative detection of faster-than-Nyquist signaling with noise whitening," in IEEE International Conference on Communications (ICC), Kuala Lumpur, Malaysia, 23-27 May 2016. (査読有、採録決定済み) (2016.5.24 発表予定)
- (3) 石原拓実, 杉浦慎哉, " 有色性雑音の影響を考慮したターボ符号化 Faster-than-Nyquist 信号の周波数領域等化, " 総合大会, 九州大学, A-8-18. (2016.3.15)

[その他]

ホームページ等

- http://www.tenure-track-tuat.org/scholar/technology/post_20.html
- <http://web.tuat.ac.jp/~sugiura/>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

杉浦 慎哉 (SUGIURA, Shinya)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：30394927

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし